

подшипника и создано программное обеспечение для анализа распределения замеров деталей на контрольной карте.

Результаты данной статьи имеют прикладной характер и могут быть использованы для статистического управления качеством производства подшипников ОАО «Харьковский подшипниковый завод». В дальнейшем предполагается более глубокое изучение проблемы статистического управления контроля качества на производстве.]

Список литературы: 1. ГОСТР 51814.3-2001 (Системы качества в автомобилестроении. Методы статистического управления процессами). 2. ГОСТР 50799.11-2000 (Статистическое управление качеством. Термины и управление). 3. Статистические методы контроля качества продукции / Под ред Бендерского А.М. – М.: Из-во стандартов, 1984. – 104 с

Поступила в редколлегию 08.11.06

УДК 621.77

Т.Б.НИКИТИНА, канд. техн. наук

СТАБИЛИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБМОТОЧНОЙ МАШИНОЙ С ПОМОЩЬЮ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Розроблена методика синтезу робастної системи управління головним електроприводом бльомінга як двомасовою електромеханічною системою. Наведено приклад вибору вагових матриць в критерії якості і динамічні характеристики синтезованої системи робастного управління.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Обмоточная машина как объект управления натяжением обмоточной ленты и скоростью вращения приводного механизма является нестационарным объектом, параметры которого изменяются в широких пределах в процессе работы. Наиболее существенное изменение параметров обмоточной машины происходит по мере выработки обмоточной ленты с кружка в процессе обмотки кабелей. При этом изменяется момент инерции кружка с обмоточной лентой и радиус схода обмоточной ленты с кружка. За счет изменения радиуса схода ленты с кружка, в частности, необходимо соответствующим образом изменять момент тормозного механизма в функции изменяющегося радиуса размотки для поддержания заданного натяжения обмоточной ленты. Это требует установки датчика изменяющегося радиуса схода ленты и соответствующего программного регулятора натяжения обмоточной ленты в функции радиуса схода ленты. Если в системе регулирования используется прямой измеритель натяжения обмоточной ленты, то обмоточная машина как объект управления замкнутой системы регулирования натяжения изменяет не только коэффициенты усиления, вызванные изменением радиуса схода ленты, но и постоянные времени, вызванные изменением момента инерции кружка с лентой.

Анализ последних достижений и публикаций по данной проблеме В [1-3] выполнен синтез оптимальных регуляторов, оптимальных наблюдателей и оптимальных компенсаторов для трех радиусов размотки кружка с обмоточной лентой – начального, среднего и конечного. Естественно, что эти регуляторы, наблюдатели и компенсаторы имеют различные коэффициенты усиления для разных радиусов размотки и их реализация требует программного изменения этих коэффициентов усиления в функции изменяющегося радиуса размотки. Для реализации такого программного регулятора коэффициентов усиления также необходимо иметь прямой измеритель изменяющегося радиуса схода ленты с кружка. Попытка использования компенсаторов, рассчитанных для одного какого либо радиуса кружка ленты – например среднего, начального либо конечного для работы системы управления при любых радиусах размотки приводило на определенных радиусах размотки либо к излишнему затягиванию времени переходных процессов, либо к повышению колебательности, а в ряде случаев, - вообще к потере устойчивости системы регулирования.

Методы синтеза систем управления, основанные на минимизации квадратичного критерия называются задачами H^2 - оптимизации. Однако, квадратичный критерий чувствителен к наличию неучтенных помех, возмущений, как со стороны внешних сигналов, так и параметрических возмущений самих объектов. Поэтому в последнее десятилетие получили развитие методы минимизации H^∞ - нормы, которая, служит эффективным показателем реакции системы на различного типа воздействия при наличии неопределенностей в описании объекта управления [4,6].

Теория H^∞ - оптимизации является обобщением известных частотных методов синтеза систем и позволяет решать широкий спектр задач управления при наличии неопределенностей. H^∞ - теория может работать как с параметрическим, так и с внешними возмущениями, причем о возмущениях делают предположения самого общего характера, например, что они ограничены по мощности.

Алгоритмы управления, полученные на основе H^∞ - теории, являются минимаксными, предлагая наилучший регулятор для наихудшего возмущения, и по этой причине превосходят алгоритмы, полученные без учета возмущений по различным критериям. С другой стороны, H^∞ - теория управления хорошо работает только при наличии предположений, в рамках которых были построены алгоритмы управления, т.е. при наличии неконтролируемых возмущений. Если же разработчик имеет информацию о действующих на систему возмущениях, то алгоритмы, полученные с учетом этой информации, как правило, оказываются лучше разработанных с помощью H^∞ - теории управления. Рассмотрим построение робастной системы управления для работы во всем диапазоне изменения радиусов размотки кружка с лентой.

Цель статьи. Целью статьи является синтез и исследование динамических характеристик робастной системы двухканального управления

обмоточной машиной по каналам регулирования скорости вращения приводного механизма и натяжения обмоточной ленты.

Изложение материала исследования, полученных научных результатов. Рассмотрим построение робастного регулятора обмоточной машины. Основное назначение системы управления обмоточной машиной заключается в поддержании скорости вращения приводного механизма $\omega_n(t)$ и натяжения обмоточной ленты $S(t)$ на заданных уровнях V_s и S_s . Существенным недостатком управления по полному вектору состояния является потеря астатизма регулирования, даже если в объекте управления имелись интегрирующие звенья. Это обусловлено введением жестких обратных связей по полному вектору состояния за счет чего и происходит потеря астатизма. Рассмотрим построение робастного астатического регулятора. Введем вектор регулируемых координат: $\vec{y}(t) = C\vec{x}(t) + D\vec{u}(t)$, компонентами которого являются: $\vec{y}(t) = \{V(t), S(t)\}^T$ и вектор задающих воздействий: $\vec{y}_s(t) = \{V_s(t), S_s(t)\}^T$. Введем вспомогательную переменную $z(t)$, связанную с регулируемой координатой $y(t)$ и ее требуемым значением $y_3(t)$ уравнением:

$$\dot{z}(t) = y_3(t) - y(t).$$

Рассмотрим уравнение состояния обмоточной машины как объекта управления:

$$\frac{d\vec{x}_0(t)}{dt} = A_0\vec{y}_0(t) + B_0\vec{u}_0(t).$$

Для построения астатического робастного регулятора введем два интегратора с переменными состояния $Z_1(t)$ и $Z_2(t)$, на входы которых подадим разность между заданными значениями скорости вращения приводного механизма $V_3(t)$ и натяжением обмоточной нити $S_3(t)$ и фактическими значениями скорости приводного механизма $V_{II}(t)$ и натяжения обмоточной ленты:

$$\frac{dZ_1(t)}{dt} = V_3(t) - V_{II}(t), \quad \frac{dZ_2(t)}{dt} = S_3(t) - S(t)$$

Введем вектор состояния интеграторов $\vec{Z}(t) = \{Z_1(t), Z_2(t)\}^T$ вектор регулируемых координат $\vec{y}(t) = \{V_{II}(t), S(t)\}^T = C\vec{X}_0(t)$.

Рассмотрим расширенную систему, включающую исходную систему и вспомогательную переменную:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\vec{x}_0}{dt} \\ \frac{d\vec{z}_0}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{x}_0(t) \\ \vec{z}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_0 \\ 0 \end{bmatrix} \vec{u}_0(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \vec{y}_3(t)$$

Тогда расширенная система с вектором состояния $\tilde{x}(t) = \bar{x}^T(t), z(t)^T$ будет описываться уравнением состояния:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A}\tilde{X}(t) + \tilde{B}\tilde{U}(t),$$

где

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A_0 & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Примем вначале $y_3(t) = 0$ и при синтезе робастного регулятора учитывать не будем.

Решив для этой системы задачу синтеза робастного регулятора, найдем оптимальное управление $\tilde{u}(t) = -\tilde{F}\tilde{x}(t)$. Тогда замкнутая система, с учетом задающего воздействия $y_3(t)$, будет описываться уравнением состояния $\dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A}\tilde{x}(t) + \tilde{B}y_3(t)$, где

$$\tilde{\tilde{A}} = \tilde{A} - B\tilde{F}, \quad \tilde{\tilde{B}} = \|0 : 1\|^T.$$

Нетрудно показать, что в установившемся режиме, т.е. при $t \rightarrow \infty$, $y(t) = y_3(t)$. Таким образом, система становится астатической по вектору регулируемых координат. Отметим, что при этом также обеспечивается астатизм регулируемой координаты и по возмущающему воздействию [5-7].

Рассмотрим стандартную форму уравнения состояния, вектора контролируемых параметров $\bar{Z}(t)$ и вектора измеряемых переменных $\bar{y}(t)$:

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= A\bar{X}(t) + B_1\bar{W}_1(t) + B_2\bar{U}(t) \\ \bar{Z}(t) &= C_1\bar{X}(t) + D_{11}\bar{W}_1(t) + D_{12}\bar{U}(t) \\ \bar{Y}(t) &= C_2\bar{X}(t) + D_{21}\bar{W}_1(t) + D_{22}\bar{U}(t) \end{aligned}$$

Введем компоненты вектора внешних воздействий $\bar{W}_1(t)$ в следующем виде: заданные значения скорости вращения приводного механизма $V_3(t)$ и натяжения обмоточной ленты $S_3(t)$, а также помехи $f_1(t), f_2(t)$ измерения ошибок $\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t)$ регулирования скорости вращения приводного механизма: $\varepsilon_1(t) = V_3(t) - V_H(t)$, и натяжения обмоточной ленты: $\varepsilon_2(t) = S_3(t) - S(t)$, а также помехи $f_3(t), f_4(t)$ измерения переменных состояния интеграторов $Z_1(t)$ и $Z_2(t)$. При этом вектор внешних воздействий примет следующий вид:

$$\bar{W}(t) = \{V_3(t), S_3(t), f_1(t), f_2(t), f_3(t), f_4(t)\}^T.$$

Компонентами вектора управления $\bar{U}(t)$ являются сила приводного механизма $F(t)$ и напряжение на входе тормозного механизма $U(t)$ так, что

$$U(t) = \{F(t), u(t)\}^T$$

Компонентами вектора контролируемых переменных $\bar{Z}(t)$ примем ошибки $\varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_2(t)$ регулирования скорости вращения приводного механизма и натяжения обмоточной ленты, переменные $Z_1(t)$ и $Z_2(t)$ состояния интеграторов, а также управляющие воздействия $F(t)$ и $U(t)$. При этом вектор контролируемых переменных имеет следующий вид:

$$\bar{Z}(t) = \{\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), Z_1(t), Z_2(t), F(t), U(t)\}^T.$$

Компонентами вектора измеряемых переменных $\bar{Y}(t)$ примем измеренные $\varepsilon_{1U}(t)$, $\varepsilon_{2U}(t)$ с помехами $f_1(t)$, $f_2(t)$ ошибки $\varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_2(t)$ регулирования скорости вращения приводного механизма $V_{II}(t)$ и натяжения обмоточной ленты $S(t)$ так, что:

$$\varepsilon_{1U}(t) = \varepsilon_1(t) + f_1(t),$$

$$\varepsilon_{2U}(t) = \varepsilon_2(t) + f_2(t),$$

а также измеренные $Z_{1U}(t)$ и $Z_{2U}(t)$ с помехами $f_3(t)$, $f_4(t)$ переменные состояния $Z_1(t)$ и $Z_2(t)$ интеграторов так, что:

$$Z_{1U}(t) = Z_1(t) + f_3(t),$$

$$Z_{2U}(t) = Z_2(t) + f_4(t),$$

и, следовательно, вектор измеряемых переменных $\bar{Y}(t)$ примет следующий вид:

$$\bar{Y}(t) = \{\varepsilon_{1U}(t), \varepsilon_{2U}(t), Z_{1U}(t), Z_{2U}(t)\}^T.$$

Для синтеза робастного регулятора необходимо определить такой динамический блок, заданный матрицами A_p , B_p , C_p , D_p , входом которого является измеряемый вектор исходной системы $\bar{y}(t)$, а выходом является вектор управления $\bar{u}(t)$ исходной системы

$$\frac{d\bar{x}_p}{dt} = A_p \bar{x}_p + B_p \bar{y}$$

$$\bar{u} = C_p \bar{x}_p + D_p \bar{y}$$

Подставив в уравнение состояния исходной системы управление, сформированное с помощью регулятора, а в уравнение состояния регулятора подставив управление регулятора в виде вектора измеряемых координат исходной системы, получим следующие уравнения.

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A\bar{x} + B_1\bar{w} + B_2[C_p\bar{x}_p + D_p[C_2\bar{x} + D_{21}\bar{w}]]$$

$$\bar{z} = C_1\bar{x} + D_{12}[C_p\bar{x}_p + D_p[C_2\bar{x} + D_{21}\bar{w}]]$$

$$\frac{d\bar{x}_p}{dt} = A_p \bar{x}_p + B_p [C_2 \bar{x} + D_{21} \bar{w}]$$

После преобразования получим

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = (A + B_2 D_p C_2) \bar{x} + B_2 C_p \bar{x}_p + (B_1 + B_2 D_p D_{21}) \bar{w}$$

$$\frac{d\bar{x}_p}{dt} = B_p C_2 \bar{x} + A_p \bar{x}_p + B_p D_{21} \bar{w}$$

$$\ddot{z} = (C_1 + D_{12} C_2) \bar{x} + D_{12} C_p \bar{x}_p + D_{12} D_p D_{21} \bar{w}$$

Запишем эти уравнения в блочном виде

$$\begin{bmatrix} \frac{d\bar{x}}{dt} \\ \frac{d\bar{x}_p}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + B_2 D_p C_2 & B_2 C_p \\ B_p C_2 & A_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{x}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 + B_2 D_p D_{21} \\ B_p D_{21} \end{bmatrix} \bar{w}$$

$$\ddot{z} = \begin{bmatrix} C_1 + D_{12} C_2 & D_{12} C_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{x}_p \end{bmatrix} + D_{12} D_p D_{21} \bar{w}$$

Тогда уравнение состояния исходной системы, замкнутой этим регулятором, в расширенном пространстве состояний $\bar{x}_3(t) = \{\bar{x}^T(t), \bar{x}_p^T(t)\}^T$ и уравнение вектора контролируемых переменных примут следующий вид

$$\frac{d\bar{x}_3}{dt} = A_3 \bar{x}_3 + B_3 \bar{w}$$

$$\ddot{z} = C_3 \bar{x}_3 + D_3 \bar{w}$$

где соответствующие матрицы равны

$$A_3 = \begin{bmatrix} A + B_2 D_p C_2 & B_2 C_p \\ B_p C_2 & A_p \end{bmatrix} \quad B_3 = \begin{bmatrix} B_1 + B_2 D_p D_{21} \\ B_p D_{21} \end{bmatrix}$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} C_1 + D_{12} C_2 & D_{12} C_p \end{bmatrix} \quad D_3 = D_{12} D_p D_{21}$$

Тогда может быть найдена матрица передаточных функций $W_3(s)$ вектора контролируемых параметров $\ddot{z}(t)$ по вектору внешних воздействий $\bar{w}(t)$ для замкнутой системы.

$$W_3(s) = C_3 (sI - A_3)^{-1} B_3 + D_3$$

Целью синтеза робастного регулятора является минимизация максимального значения следа матрицы амплитудно – частотных характеристик матричной передаточной функции $W_3(s)$ вектора контролируемых параметров $\ddot{z}(k)$ по вектору внешних воздействий $\bar{w}(k)$. Необходимо найти такой регулятор с матричной передаточной функцией $w_p(s)$, который бы минимизировал H^∞ норму

$$J = \min_{w_p} \max_{-\infty < \omega < \infty} \text{trace}[W^*(-j\omega)W(j\omega)]$$

Синтез регулятора, минимизирующего H^∞ – норму, сводится к нахождению собственных значений матриц Гамильтона по управлению

$$H_\infty = \begin{bmatrix} A & \gamma^{-2}B_1B_1^T - B_2B_2^T \\ -C_1^TC_1 & -A^T \end{bmatrix},$$

и по фильтрации

$$J_\infty = \begin{bmatrix} A^T & \gamma^{-2}C_1^TC_1 - C_2^TC_2 \\ -B_1B_1^T & -A \end{bmatrix},$$

что соответствует решению уравнений Риккати по управлению:

$$A^TX_\infty + X_\infty A - X_\infty(B_2B_2^T - \gamma^2B_1B_1^T)X_\infty + C_1^TC_1 = 0$$

и по фильтрации:

$$AY_\infty + Y_\infty A^T - Y_\infty(C_2^TC_2 - \gamma^2C_1^TC_1)Y_\infty + B_1B_1^T = 0$$

На рис.1 показаны переходные процессы скоростей вращения приводного двигателя а) и приводного механизма б) системы с робастным регулятором по заданию на регулятор скорости для трех рассматриваемых радиусов размотки. Установившиеся значения скоростей приводного механизма и приводного двигателя равны заданному значению скорости.

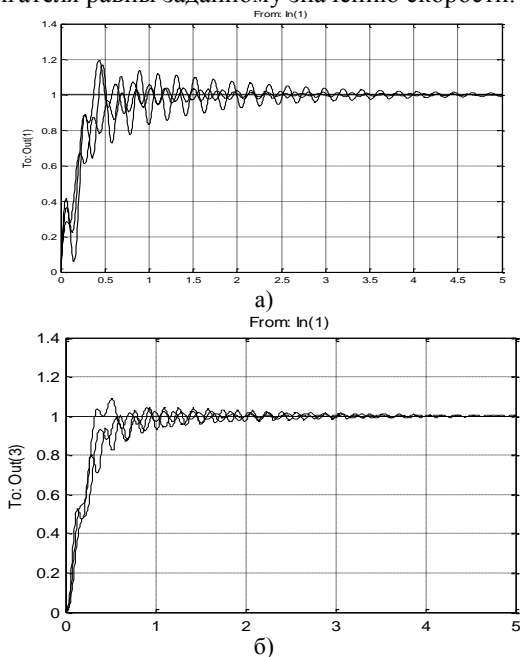


Рис. 1. Переходные процессы скорости приводного двигателя а) и приводного механизма б) в робастной системе управления бумагообмотчика ИЖ – 32.

Выводы из проведенного исследования, перспективы этого направления. Таким образом, подбирая матрицы в исходной системе удалось получить приемлемые показатели качества переходных процессов как по заданию на регулятор скорости приводного механизма, так и на регулятор регулятор натяжения обмоточной ленты.. Установившиеся значения скоростей вращения приводного механизма и приводного двигателя по заданию на регулятор скорости равны задающему воздействию, а по заданию на регулятор натяжения эти скорости – равны нулю. Установившееся значение натяжения по заданию на регулятор натяжения равно заданному значению натяжения. Подбирая величину параметра γ при синтезе робастных регуляторов удалось получить практически одинаковые переходные процессы для всех радиусов размотки кружка с лентой при использовании регулятора и наблюдателя, синтезированного для среднего радиуса размотки. В целом величина параметра γ характеризует толерантность синтезированного робастного регулятора к изменению параметров обмоточной машины как объекта управления. Следует заметить, что при больших форсировках переходных процессов [8-9] путем надлежащего выбора весовых матриц в исходной задаче робастного управления удастся получить достаточно высокое быстродействие системы, однако при этом не удастся подобрать величину параметра γ , при котором система сохраняет устойчивость во всем диапазоне изменения параметров обмоточной машины как объекта управления с синтезированным робастным регулятором для среднего радиуса размотки кружка обмоточной ленты.

Список литературы: 1. Никитина Т.Б. Синтез приближенно – оптимальных нелинейных систем цифрового управления технологическими процессами с аналитическими нелинейностями. //Автоматизация виробничих процесів. Київ. - 2003. - №2(17). - С.62-65. 2 Никитина Т.Б. Синтез цифровых нелинейных многоканальных систем управления. //Автоматизация виробничих процесів. Київ. - 2005. - №2 (21) .С.115-121. 3. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. Харьков, УИПА.2005. – 511с. 4. Куценко А.С., Никитина Т.Б. Уточнение параметров нелинейных оптимальных регуляторов каналов многоканальных систем при последовательном синтезе. Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. - №59. с.17 – 25. 5. Никитина Т.Б. Приближенно оптимальное цифровое управление электроприводами с аналитическими нелинейностями. //Вестник НТУ «ХПИ». Сб. научных трудов. Харьков: НТУ «ХПИ». - 2003. - №10. Т1. - С.321-322. 6. Никитина Т.Б. Синтез приближенно – оптимальных нелинейных систем цифрового управления технологическими процессами с аналитическими нелинейностями. //Автоматизация виробничих процесів. Київ. - 2003. - №2(17). - С.62-65. 7. Никитина Т.Б. Синтез многоканальных нелинейных электромеханических систем. //Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Харьков. НТУ «ХПИ». – 2005. - №45. - С. 130 – 131. 8 Никитина Т.Б. Ограничение динамических нагрузок в нелинейной системе совместного управления главными приводами блюминга с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл. //Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Харьков. НТУ «ХПИ». – 2006. - №9 - С. 95 – 102. 9. Никитина Т.Б. Ограничение нагрузок в нелинейных многоканальных системах с оптимальным управлением. //Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Частина 4. Київ. 2006. С. 90 – 92.

Поступила в редколлегию 14.06.06